

Horus, un modèle conceptuel de simulation de la pollution en réseau d'assainissement - structure et validation

Horus, a conceptual model for pollution simulation in sewer networks - structure and validation

M. Zug et L. Phan

Volume 12, numéro 4, 1999

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/705370ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/705370ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

0992-7158 (imprimé)

1718-8598 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Zug, M. & Phan, L. (1999). Horus, un modèle conceptuel de simulation de la pollution en réseau d'assainissement - structure et validation. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 12(4), 643-660.
<https://doi.org/10.7202/705370ar>

Résumé de l'article

Les rejets urbains par temps de pluie constituent à l'heure actuelle une des causes majeures de la pollution du milieu naturel. Dans ce contexte, la modélisation est un des moyens pour comprendre, caractériser et finalement anticiper cette pollution.

L'objet de cet article est la présentation générale du modèle de simulation HORUS et les principaux résultats obtenus en phase de validation.

HORUS est un modèle de recherche événementiel de type conceptuel et a pour objectif de reproduire le fonctionnement d'un réseau d'assainissement par temps de pluie, au point de vue de l'hydraulique et de la pollution pour des réseaux pluviaux ou unitaires pouvant contenir des ouvrages particuliers. HORUS simule les différents phénomènes d'accumulation et d'érosion des solides sur les surfaces imperméables ainsi que les phénomènes de sédimentation ou d'érosion en collecteurs, en respectant un niveau de complexité homogène pour l'ensemble des étapes de calcul. Les polluants simulés sont les Matières En Suspension (MES), Demande Chimique en oxygène (DCO) et Demande Biochimique en oxygène à 5 jours (DBO5). HORUS a été calé, validé et transposé sur dix réseaux réels de caractéristiques et de localisations variées, avec une centaine d'événements pluvieux de caractéristiques très différentes. Les différents sites et mesures ont permis une large validation et l'obtention de résultats tout à fait satisfaisants pour les pollutogrammes en concentration et flux. Les résultats de validation qualitative et quantitative sur différents bassins versants sont proposés au sein de cet article.

Horus, un modèle conceptuel de simulation de la pollution en réseau d'assainissement – Structure et validation

Horus, a conceptual model for pollution simulation in sewer networks – Structure and validation

M. ZUG *, L. PHAN

Reçu le 21 août 1998, accepté le 30 mai 1999**

SUMMARY

Urban wet weather pollution represents at the present time one of the major causes of pollution of receiving waters. During a storm event, generation of pollution and erosion of the impervious area or the sewer itself are very complex processes, which respond to a large number of relevant factors. In this context, modelling is one way to study, characterize, understand and eventually anticipate this pollution.

Horus is an event-based conceptual research model. The objective of the Horus model is, taking into account the characteristics of the catchment and the structure of the sewerage system, to reproduce the hydrographs and TSS, COD and BOD concentrations generated by any rainfall event. The desire to develop a model with a reduced number of parameters oriented our choice towards conceptual formulations, calibrated and validated on the maximum number of real sites. Horus simulates the principal phenomena involved in the generation and transfer of pollution in urban drainage systems, with a homogeneous level of complexity for all steps in the calculations. The algorithms have been chosen for their robustness, their simple mathematical formulation, their reduced number and their suitability for calibration and validation. Horus consists of five main connected modules:

- a hydrological module consisting of a linear reservoir including runoff losses;
- a hydraulic module based on the solution of the Muskingum equations (including particularities such as weirs, basins, sluice gates...);

Anjou Recherche-Vivendi Water, 1 place de Turenne, 94417 Saint Maurice, France.

* Correspondance. E-mail : mathieu.zug@generale-des-eaux.net

** Les commentaires seront reçus jusqu'au 15 novembre 2000.

– a module for producing and transporting solids in the catchment, which covers several phenomena. The build-up model of catchment deposits is one initially proposed by the SWMM. The washoff by rainfall is modelled by a modification of the SWMM formulation, adapted for a large range of rainfall events. The propagation of particles by runoff is modelled using a linear reservoir with a lag-time different from the runoff initially proposed by Brombach. COD and BOD are calculated through a potency factor governing the relations between these pollutants and TSS. This module includes an algorithm for gully pots; this algorithm has been programmed but is not yet activated;

– a module for producing and transporting solids in the sewer system. Sediment transport in the sewer is modelled by the Velikanov theory, with the calculation of sedimentation and erosion of solids during dry or rainy weather. Pollutographs are propagated by convection. COD is calculated through a potency factor governing the relations between this pollutant and TSS. This module includes algorithms for bed load and wash load calculations; these algorithms have been programmed but are not presently active;

– a module for numerical optimization using the Powell method and evaluation of hydraulic and pollution results for calibration and continuous simulations.

We have used ten different sites (combined, mixed or separate systems, with or without deposits in collectors), where there were reliable quantitative and qualitative measurements during main rainfall events, for the phases of calibration, validation or transposition. The urban catchments present different characteristics: imperviousness coefficients between 22 and 78%; mean catchment slopes between 0.3 and 6.5%; collector slopes between 0 and 27.4 mm/m. The rainfall events used for model development cover a wide range: antecedent dry weather periods (ADP) between 2 hours and 21 days; rainfall heights up to 40 mm; rainfall peaks over five minutes (I_{max5}) between 2.2 and 60 mm/h; and rainfall durations between 20 minutes and 12 hours.

During the calibration stage, the different parameters were adjusted through numerical optimization using the Powell method. This method allowed the choice of one group of parameters for all the catchments and rainfalls used in this stage. The validation phase was carried out in two stages. The first stage was completed with 47 other rainfall events (with different dry weather periods, rainfall heights, rainfall peaks...) on the same sites that were used for the calibration. The second stage was carried out on three other sites (Aix-Zup, Budron and Mantes la Ville). In these two stages, the simulations were made without changes to the calibrated parameters. The single adjusted parameter was the initial mass of particles present in the catchment and in the sewer after the preceding rain. The qualitative validation showed satisfactory results for TSS, COD and BOD pollutographs expressed in concentrations, with respect to the shape of the pollutographs, their maximum, and the mass transported in the system.

The quantitative validation step revealed that the most significant errors are for the TSS concentrations lower than 50 mg/l for the separate catchment and 100 mg/l for the mixed and combined sewers. Thus, for measurements higher than 50 mg/l for the separate catchment, the mean relative errors and standard deviation are of 0.15% and 40% and for measurements higher than 100 mg/l for the mixed and combined sewer, the mean relative errors and standard deviation are of 13% and 60%. Moreover, for 75% of the simulated rainfalls the calculation of the transited mass of TSS ranged between - 20 and + 20%.

The results obtained are encouraging and therefore allow subsequent developments to be considered: refinement of the model by evaluation of bed load, simulations to evaluate flows and masses of deposits over a long period, and the study and modelling of other pollutants. This will be possible only if field data are available.

Key-words: urban drainage, modelling, pollution, Horus, validation.

RÉSUMÉ

Les rejets urbains par temps de pluie constituent à l'heure actuelle une des causes majeures de la pollution du milieu naturel. Dans ce contexte, la modélisation est un des moyens pour comprendre, caractériser et finalement anticiper cette pollution.

L'objet de cet article est la présentation générale du modèle de simulation Horus et les principaux résultats obtenus en phase de validation.

Horus est un modèle de recherche événementiel de type conceptuel et a pour objectif de reproduire le fonctionnement d'un réseau d'assainissement par temps de pluie, au point de vue de l'hydraulique et de la pollution pour des réseaux pluviaux ou unitaires pouvant contenir des ouvrages particuliers. Horus simule les différents phénomènes d'accumulation et d'érosion des solides sur les surfaces imperméables ainsi que les phénomènes de sédimentation ou d'érosion en collecteurs, en respectant un niveau de complexité homogène pour l'ensemble des étapes de calcul. Les polluants simulés sont les Matières En Suspension (MES), Demande Chimique en oxygène (DCO) et Demande Biochimique en oxygène à 5 jours (DBO5). Horus a été calé, validé et transposé sur dix réseaux réels de caractéristiques et de localisations variées, avec une centaine d'événements pluvieux de caractéristiques très différentes. Les différents sites et mesures ont permis une large validation et l'obtention de résultats tout à fait satisfaisants pour les pollutogrammes en concentration et flux. Les résultats de validation qualitative et quantitative sur différents bassins versants sont proposés au sein de cet article.

Mots clés : *assainissement urbain, modélisation, pollution, Horus, validation.*

1 - INTRODUCTION

De nombreux travaux de recherche s'accordent à reconnaître l'importance de la pollution des rejets urbains par temps de pluie (ELLIS et HVTIVED-JACOBSEN, 1996) et estiment que les flux polluants à l'échelle de l'événement pluvieux sont très largement supérieurs aux flux journaliers rejetés par les stations d'épurations et ceci, pour de nombreux paramètres polluants (CHEBBO et al., 1995). L'appréhension de cette pollution commence par une meilleure connaissance des phénomènes mis en jeu à l'amont et au sein du réseau d'assainissement. À l'heure actuelle, elle passe par deux méthodes principales, à savoir la mesure in situ et la modélisation numérique. Mais si la modélisation numérique de l'hydraulique permet l'obtention de résultats de bonne qualité, la modélisation de la pollution reste délicate et ceci, autant au niveau de la complexité des phénomènes mis en jeu et de l'état des connaissances que de la disponibilité ou l'existence de données expérimentales spécifiques et fiables. Plusieurs modèles de simulation de la pollution en réseau d'assainissement ont été élaborés depuis trente ans (BERTRAND-KRAJEWSKI et al., 1993) mais nombre d'entre eux sont restés dans une phase de calage et les résultats en phase de validation sont rarement fournis.

Le modèle Horus, établi en collaboration avec l'École nationale du génie de l'eau et de l'environnement de Strasbourg (ENGEE) et l'Institut de Mécanique des Fluides (IMF) de Strasbourg. Horus est un outil de recherche, c'est-à-dire

une sorte de « laboratoire numérique » et représente ainsi une contribution à ce domaine d'étude. Le modèle Horus présente une modélisation conceptuelle de l'hydraulique et de la pollution pour des réseaux pluviaux ou unitaires pouvant contenir des ouvrages particuliers, dans le but de reproduire le fonctionnement d'un réseau d'assainissement par temps de pluie. De plus, Horus a également été conçu et réalisé pour répondre à de futurs usages, comme le couplage avec un modèle de station d'épuration (NIELSEN *et al.*, 1996).

2 – LE MODÈLE HORUS

2.1 Description du réseau et de son bassin versant associé

La mise en œuvre du modèle suppose une schématisation préalable du réseau. Cette schématisation est obtenue en ne retenant que les collecteurs principaux. Ces collecteurs sont eux-mêmes divisés en tronçons de caractéristiques homogènes (dimension, pente...) en tenant compte de surcroît d'un certain nombre de points singuliers du réseau (confluences, déversoirs, défluence, injection, raccordement d'une zone de collecte...). Pour chacun de ces points ainsi définis, la zone de collecte associée est déterminée et on vérifie que cette zone présente des caractéristiques homogènes (imperméabilisation, occupation du sol, pente...). Si ce n'est pas le cas, on procède alors à une subdivision en autant de zones homogènes nécessaires. Ainsi, le bassin versant et son réseau associé sont schématisés par une succession de points, qui peuvent ou non être alimentés par un bassin versant ou une injection, et des tronçons de collecteurs. Le calcul des débits et de la pollution sont alors menés point par point et de l'amont vers l'aval.

2.2 Description sommaire du modèle Horus

Une description détaillée du modèle Horus ayant déjà été proposée par ailleurs (ZUG, 1998), seules les principales caractéristiques du modèle sont rappelées ici.

Horus est actuellement limité à 100 nœuds de calcul et donc autant de collecteurs ou de bassins versants, six types de déversoirs d'orage, les polluants MES, DCO et DBO₅, et permet en outre d'effectuer les calculs avec 10 mesures de pluie sur le même site d'étude. Le modèle Horus comporte cinq modules principaux interconnectés et les algorithmes utilisés intègrent les récentes connaissances (ASHLEY et CRABTREE, 1992 ; VERBANCK *et al.*, 1994) en matière de production, de transport et de caractéristiques de la pollution particulière (voir *figure 1*). Les différents algorithmes de génération et de transfert de la pollution du modèle ont été choisis en fonction des résultats du programme « Banc d'essai des algorithmes de modélisation de la pollution par temps de pluie » (ZUG *et al.*, 1998b). Ce Banc d'essai a été mis au point pour tester les différents algorithmes applicables à chacun des phénomènes élémentaires composant le processus général de la pollution.

Les différents modules du modèle Horus sont :

– un module hydrologique modélisé par un réservoir linéaire et des pertes au ruissellement ;

– un module hydraulique fondé sur la résolution des équations de Muskingum. Ce module dispose également d'une modélisation de singularités comme les déversoirs d'orage, les confluences ou divergences. Le modèle de Muskingum a été adopté pour sa programmation aisée et ses résultats intéressants mais ne permet pas la prise en compte des influences aval et constitue donc une limite d'Horus ;

– un module de production et de transfert des solides en surface de bassin versant qui comporte plusieurs phénomènes. L'accumulation des solides en surface est de type asymptotique initialement proposée par le SWMM (SARTOR et BOYD, 1972 ; ALLEY et SMITH, 1981 ; BUJON, 1988). L'érosion des solides en surface, est décrite à partir d'une modification des formules proposées par le SWMM (JEWELL et ADRIAN 1978 ; BUJON, 1988) et des expérimentations de BROMBACH (1984) pour une large gamme de pluies (ZUG, 1998). Le calcul de la DCO et DBO5 est réalisé par un facteur d'attachement aux MES provenant du lessivage. Un algorithme de fonctionnement des avaloirs a été programmé mais n'est pas actif ;

– un module de transport solide en réseau, modélisé par la théorie énergétique de Velikanov par le calcul de sédimentation et d'érosion des particules solides de temps sec ou de temps de pluie (ZUG et al., 1998a). Les particules solides sont décrites par le couple vitesse de chute-densité (ω_s et s) dont les valeurs varient entre des fines (de diamètre médian 52 μm , $\omega_s = 5,4$ m/h et $s = 2,00$) transportées principalement en suspension et des plus grosses ($\omega_s = 45$ m/h et $s = 2,65$) constituant les dépôts et participant au transport solide total (VERBANCK et al., 1994). La propagation des pollutogrammes en suspension est modélisée par une équation de convection. Le calcul de la DCO et DBO5 est réalisé par un facteur d'attachement aux MES contenues dans les dépôts en collecteurs. Des algorithmes de charriage et de transport en solution ont été programmés mais non encore activés ;

– un dernier module comprenant des critères numériques de comparaison des simulations et des mesures ainsi qu'un algorithme d'optimisation numérique basé sur la méthode de Powell (NUMERICAL RECIPIES, 1986) est utilisé pour le calage semi-automatique des différents paramètres.

Le modèle Horus fournit, à l'exutoire de chaque sous bassin versant modélisé et en chaque nœud du réseau (collecteurs, déversoirs...) trois types de résultats :

– des informations générales sur la simulation effectuée comme le nom du réseau, le nom de la pluie, la date et la durée de la simulation...

– les conditions initiales et finales concernant les dépôts en surface de bassin versant et en collecteur ;

– un fichier de type texte comportant le hyétogramme, les hydrogrammes mesurés et simulés et les pollutogrammes, en concentration et en flux pour les différents polluants choisis, mesurés et simulés ;

– des résultats quantitatifs de comparaison hydrauliques et en pollution entre les simulations et les mesures.

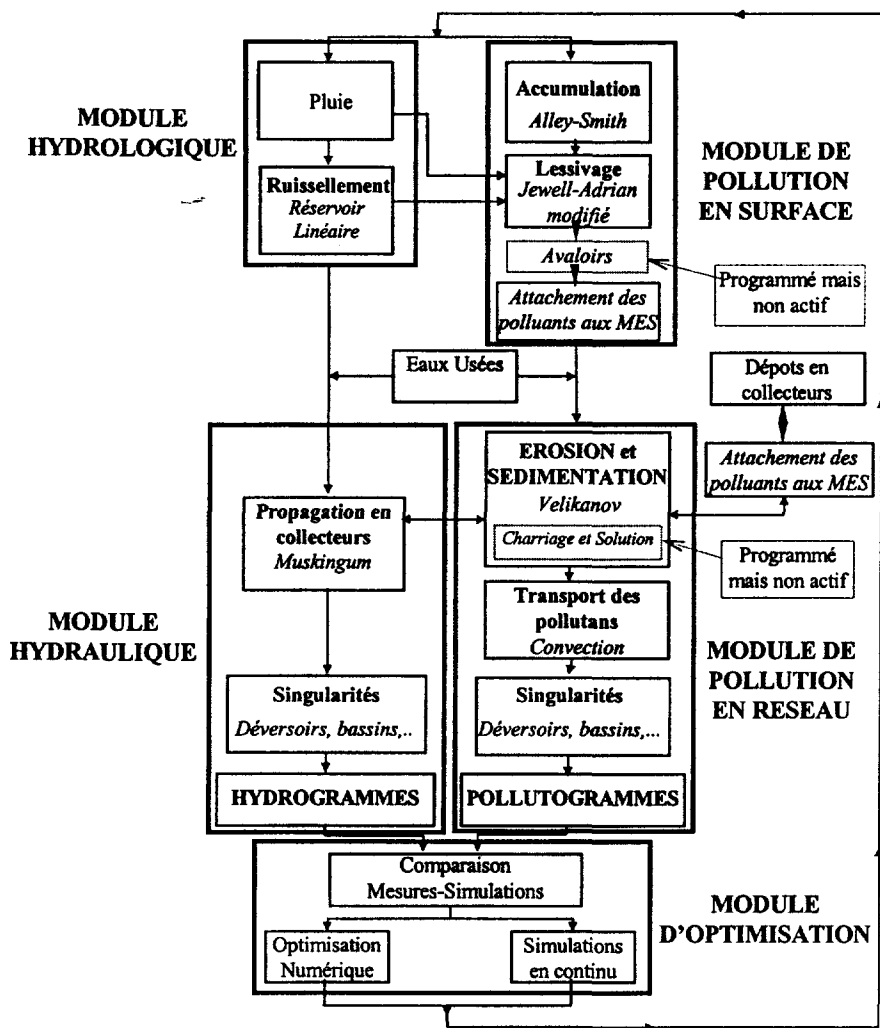


Figure 1 Schéma général du modèle Horus.
Overall presentation of the Horus model.

3 - LES SITES ET DONNÉES DE TESTS DU MODÈLE HORUS

Les opérations de mise au point du modèle Horus ont été réalisées sur dix bassins versants pour lesquels on dispose de mesures simultanées de pluie, d'hydraulique et de pollution. Ces réseaux sont de type séparatif, pseudo-séparatifs ou unitaire et sont localisés dans la région parisienne (Maurepas, Massy, Les Ulis Nord, Fresnes-Choisy, Mantes la Ville) dans le midi de la France (Aix

Zup et Aix Nord), en Bretagne (Brest), en Alsace (Entzheim) et en Suisse (Budron). Ces bassins versants présentent des caractéristiques très différentes et ceci au niveau de la surface drainée (de 13 à 2 486 ha), du coefficient de ruissellement (de 10 à 69 %), de l'occupation du sol, des pentes moyennes des bassins (de 0,3 à 6,5 %) et du réseau (de 0,2 à 2,7 %), de la présence de dépôts en collecteur, de la présence d'eaux usées et de la présence de singularités hydrauliques comme des confluences, des défluences et des déversoirs d'orage (Fresnes-Choisy et Brest). Compte tenu du choix du modèle hydraulique simplifié, une série de vérifications a été menée en comparant les résultats hydrauliques d'Horus et du modèle de Barré de Saint Venant du logiciel HYDROWORKS (N 1996). Ces comparaisons ont montré que l'hypothèse d'absence d'influence aval aux points singuliers et à l'exutoire des réseaux de tests et pour les pluies disponibles est vérifiée.

En adoptant la classification proposée par (PHILLIPE et RANCHET, 1987) qui distingue trois types de réseaux selon la nature des effluents y transitant, le *tableau 1* récapitule les différents sites utilisés.

Tableau 1 Classification des réseaux utilisés.

Table 1 *Used sewer networks classification.*

Classe de réseau	Nature des effluents	Bassins versants correspondants
Type 1	Eaux pluviales avec ou sans écoulements de temps sec peu ou pas pollués	Maurepas, Aix Zup, Aix Nord, Budron (Suisse), Massy, Brest
Type 2	Eaux pluviales contaminées par des eaux usées	Les Ulis Nord, Fresnes-Choisy
Type 3	Effluents unitaires	Entzheim, Mantes la Ville

Pour ces sites de tests, nous disposons d'un échantillon de 116 événements pluvieux qui couvrent une large gamme de pluie, et ceci autant en durée (de 0,2 à 32 h), durée de temps sec précédent la pluie (de 0 à 60 jours), hauteur de pluie (de 1 à 50 mm), intensité moyenne (de 0,5 à 22 mm/h) et intensité maximale sur cinq minutes (1 à 88 mm/h). Afin de préciser les caractéristiques des pluies disponibles, la *figure 2* représente les événements pluvieux de la région pluviographique 1 sous forme de courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) avec les courbes de période de retour de 1, 2 et 5 ans.

Pour l'ensemble des pluies, nous disposons de 1 096 mesures de MES (cas du Fresnes-Choisy non pris en compte), qui couvrent une large gamme de MES (de 6 à 4505 mg/l), DCO (de 5 à 2 085 mg/l), DBO5 (de 0 à 590 mg/l) et DCO/DBO5 (de 0 à 23). Afin de préciser les caractéristiques de la pollution en fonction du type de réseau, les variations (hormis les valeurs extrêmes correspondant aux valeurs supérieures à plus de trois hauteurs du bord supérieur ou inférieur de la boîte de dispersion) des MES et le rapport DCO/DBO5 sont présentées sous forme de boîtes de dispersion à la *figure 3* (les résultats pour les réseaux de type x seront notés Tx). Les concentrations les plus fortes sont mesurées, en moyenne, sur les bassins urbains de type 3, assainis en mode unitaire (Mantes la Ville et Entzheim). En seconde position, on trouve les bassins

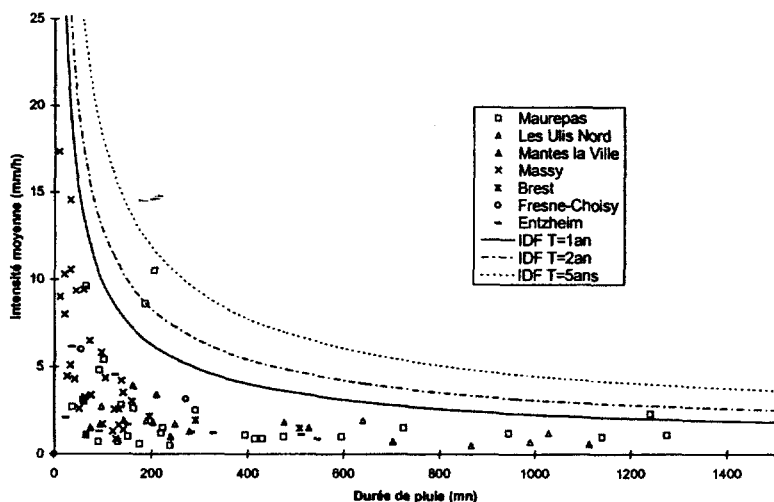


Figure 2 Courbe IDF des pluies disponibles pour la région pluviographique 1.
IDF curves for the pluviographic region 1.

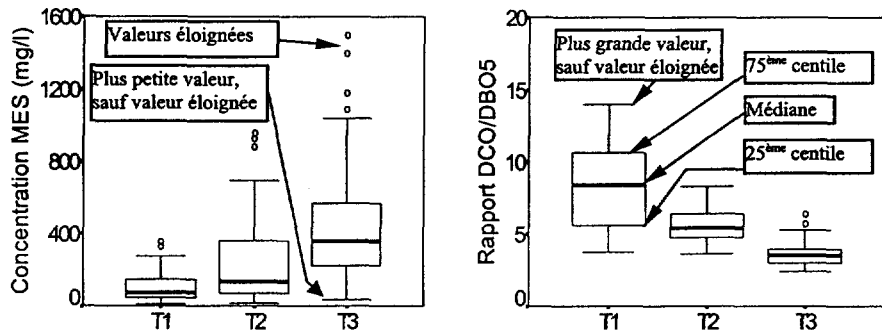


Figure 3 Boîtes de dispersion des mesures en pollution disponibles (sauf valeurs extrêmes).
Box plot of available pollution measurements (without extreme values).

de type 2 (Ulis Nord et Fresnes-Choisy), toutefois, le bassin des Ulis Nord est celui ayant les valeurs extrêmes les plus fortes. Les eaux de ruissellement urbain des bassins versants constituant la classe 1 sont, en moyenne les plus faiblement pollués et présentent la meilleure biodégradabilité en temps de pluies. Néanmoins, en terme de valeurs extrêmes, les concentrations sur les bassins de cette catégorie peuvent être importantes (maximum de 3 744 mg/l en MES à Aix Zup).

4 – DESCRIPTION SOMMAIRE DE LA PHASE DE CALAGE

La description détaillée de la phase de calage des modules de production et de transfert des solides en surface de bassin versant et en réseau d'Horus ayant déjà été proposée par ailleurs (ZUG *et al.*, 1998c ; ZUG *et al.*, 1998a), seul un bref rappel est proposé ici.

Le calage des algorithmes et de leurs paramètres a été réalisé en deux étapes. La première pour la pollution provenant de la surface (accumulation, lessivage et transport sur les bassins versants), et réalisée sur trois bassins de type 1 que sont Maurepas, Massy et Brest et ceci avec cinq pluies de caractéristiques différentes ayant des période de retour sur I_{max5} de deux semaines à un an. La deuxième pour la pollution dans le réseau d'assainissement (eaux usées, sédimentation et/ou érosion des solides en suspension ou contenus dans les dépôts) et réalisée sur trois bassins de type 2 et 3 que sont Les Ulis Nord, Fresnes-Choisy et Entzheim et ceci avec six pluies différentes ayant des périodes de retour sur I_{max5} de une semaine à un an.

Le calage a été réalisé par optimisation numérique et a conduit au choix d'un seul et unique jeu de paramètres pour l'ensemble des six sites et onze pluies étudiées dans cette phase.

5 – VALIDATION QUALITATIVE

L'approche qualitative est la méthode la plus aisée et certainement la plus directe pour évaluer les performances d'un modèle. Elle consiste à représenter graphiquement les valeurs simulées et mesurées et à juger de la qualité de l'ajustement. Cette méthode est bien souvent la seule présentée dans la littérature et est bien entendue « subjective » puisqu'elle dépend fortement de l'observateur.

La validation du modèle Horus a été réalisée en deux étapes. La première sur les mêmes sites utilisés lors du calage, et la seconde sur les quatre sites non encore utilisés (soient Aix Zup, Aix Nord, Budron et Mantes la Ville), étape également appelée transposition. Ces deux étapes ont été menées **sans aucune modification du jeu de paramètres de calage**, et avec 60 pluies non utilisées précédemment (dont 47 pluies pour la première étape et 23 pour la seconde).

On présentera ici que quelques exemples de résultats de la phase de validation sur un bassin séparatif de superficie réduite (Massy, 26 ha), sur un bassin mixte de superficie importante ou quelques dépôts en collecteur ont été constatés (Fresnes-Choisy, 2486 ha) et sur un bassin unitaire ou d'importants dépôts en collecteurs ont été constatés (Entzheim, 40 ha). Pour l'ensemble des simulations, les seuls paramètres ajustés ont été :

- les conditions initiales de chaque simulation, à savoir les masses résiduelles présentes en surface de bassin versant ou dans les collecteurs à la fin de la pluie précédente ;

- le taux d'accumulation journalier en surface ;
- un paramètre pour la DCO et un pour la DBO₅.

5.1 Réseau de Massy

Le bassin versant de Massy est situé dans le département de l'Essonne (91) au Sud de Paris. Il couvre une superficie de 26 ha et est composé d'un habitat de type résidentiel à l'amont et de stades et parc de sport à l'aval. Le coefficient d'imperméabilisation est de 21 %. Le réseau d'assainissement de Massy est de type séparatif avec un faible débit de temps sec. La longueur totale du réseau prise en compte est de 940 m, les canalisations ayant un diamètre variant entre 300 mm et 900 mm, ceci pour une pente moyenne de 6,7 %. La campagne de mesure effectuée de 1993 à 1995 dans le cadre du suivi d'un pilote de décantation lamellaire a permis de retenir 25 événements pluvieux après critique et validation des données. Pour cette étude, nous disposons des mesures de pluie et de pollution mais pas des hydrogrammes. Compte tenu de l'occupation des sols de type résidentiel hétérogène, le taux d'accumulation journalier a été fixé à 3 kg/j/ha. Les résultats fournis par le modèle sont tout à fait satisfaisants et permettent une bonne reproduction des pollutogrammes en concentration pour les différents polluants, et ceci sur une vingtaine d'événements pluvieux.

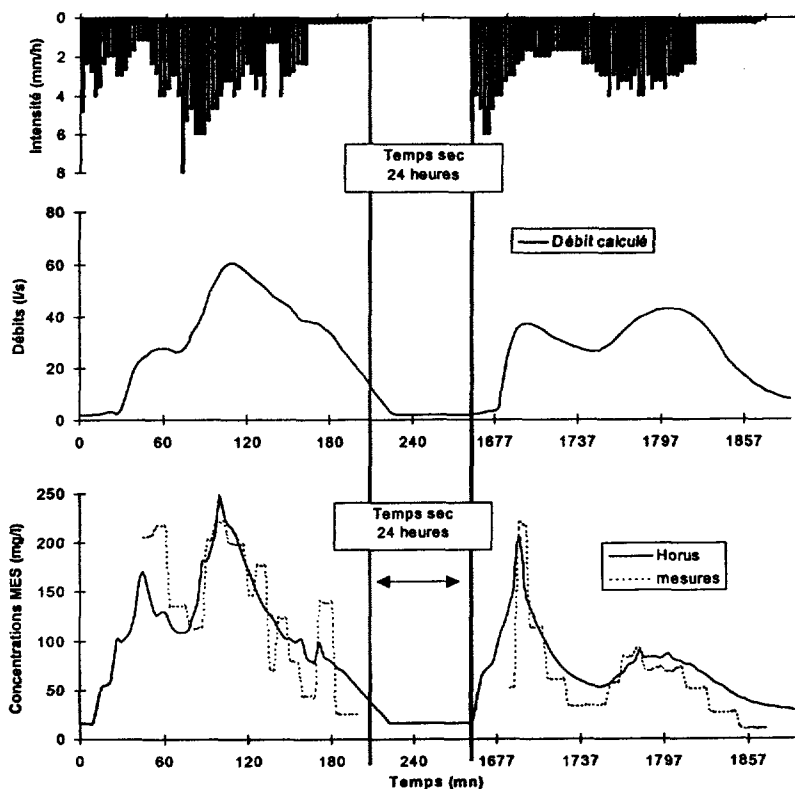


Figure 4 Massy, pluies enchainées du 18/07/94 au 19/07/94.

Massy, 18/07/97 to 19/07/94 rainfalls serie.

À titre d'exemple, on présente les résultats d'une simulation enchaînée d'une série de deux pluies à la figure 4. Cette série a une durée d'environ 31 heures, est composée des pluies du 18/07/94 et 19/07/94, séparées d'une durée de temps sec de 24 heures et chacune de période de retour sur lmax5 d'environ 2 semaines. Les résultats en concentration de MES sont tout à fait satisfaisants pour chaque pluie et du même type que sur les événements isolés, même si la reproduction des premiers pics de concentrations n'est pas « parfaite ». De plus, la durée de temps sec entre les deux pluies étant relativement faible, permet de valider en partie l'algorithme de lessivage puisque la masse résiduelle en surface à la fin de la pluie du 18/07/94 permet une bonne reproduction de la seconde pluie.

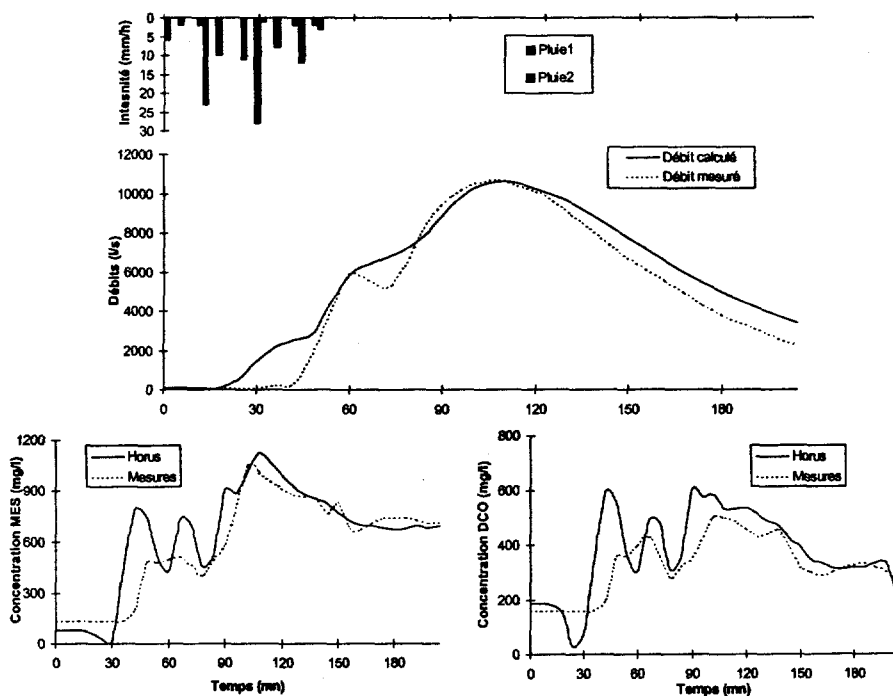


Figure 5 Fresnes-Choisy, pluie du 15/09/86.
Fresnes-Choisy, 15/09/86 rainfall.

5.2 Réseau de Fresnes-Choisy

Le bassin versant du Fresnes-Choisy est situé dans la banlieue Sud de Paris et concerne plusieurs départements. Pour des commodités de simulation, nous nous sommes limités aux seuls départements des Hauts de Seine et du Val de Marne, gardant ainsi une surface d'environ 2 500 ha et ayant une occupation des sols très hétérogène (pavillons, résidentiel, autoroute, industries...), mais de densité moyenne de 100 hab./ha. Le coefficient de ruissellement est calé d'après des études antérieures. Le réseau d'assainissement est de type sépara-

tif, mais comporte un flot de temps sec d'environ 75 l/s. La longueur prise en compte pour les simulations est d'environ 23 km, les collecteurs ayant des diamètres variant entre 600 et 4 000 mm et des pentes entre 1,1 et 36,5 ‰. La campagne de mesure effectuée en 1986 a permis de retenir 3 événements pluvieux après critique et validation des données. Compte tenu de l'occupation des sols de type hétérogène, le taux d'accumulation journalier a été fixé à 3 kg/j/ha pour les zones d'habitat résidentiel discontinu et 12,5 kg/j/ha pour les zones d'habitat résidentiel dense. Les résultats fournis par le modèle sont satisfaisants et permettent une bonne reproduction des différents pollutogrammes en concentration et en flux sur les trois pluies disponibles.

La *figure 5* présente les résultats d'une simulation de la pluie du 15/09/86. Cette pluie est intéressante puisqu'elle génère un débit maximum d'environ 10 000 l/s, un volume de 63 000 m³ et une concentration maximale en MES supérieure à 1 000 mg/l. Pour cet épisode pluvieux, les mesures de pluie ont été réalisées par deux pluviographes situés sur le site, et permettent une intéressante reproduction des débits, concentrations et flux en MES et DCO mesurés à l'exutoire d'un collecteur de 4 m de diamètre.

5.3 Réseau d'Entzheim

Le bassin versant d'Entzheim est situé dans la banlieue sud de Strasbourg (67). Il couvre une superficie de 40 ha et est composé de l'ancien village, de zones résidentielles et de lotissements, pour une densité moyenne 42 hab./ha, avec un coefficient d'imperméabilisation de 39 %. Le réseau d'assainissement, de type unitaire comporte un débit de temps sec d'environ 2,8 l/s. Ce faible débit allié avec des pentes de collecteurs faibles, nulles voire négatives provoque la formation d'importants dépôts à différents endroits du réseau et principalement à l'extrémité aval de celui-ci qui a une pente nulle sur environ 35 m. La longueur prise en compte pour les simulations est de 1 730 m, les canalisations ayant des diamètres variant entre 200 et 1 200 mm pour des pentes allant de - 7 ‰ à 20 ‰. Étant donné le modèle hydraulique simplifié adopté, les tronçons à pentes nulles ou négatives ont été schématisés avec des pentes très faibles.

À titre d'exemple, on présente les résultats de simulation de la pluie du 03/05/88 à Entzheim à la *figure 6* qui présente une configuration très intéressante : une durée d'environ dix heures, avec une durée de temps sec d'environ sept jours, un premier pic en MES très important (1 700 mg/l) en début de pluie (dont une des explications serait une remise en suspension d'une grande partie des dépôts constitués par temps sec) alors que pour les pics de débits suivants les valeurs de concentrations ne dépassent pas 650 mg/l. De plus, cette pluie a déjà été utilisée pour la mise au point ou le test de deux modèles, à savoir HYPOCRAS (BERTRAND-KRAJEWSKI 1992) et MOSQUITO (DEBARDAT, 1991).

La description assez fine du réseau d'Entzheim (14 sous bassins versants modélisés) où d'importants dépôts sont constitués par temps sec permet d'obtenir des résultats de simulations qui corroborent les observations quant à leur localisation et leur importance (ARTIÈRES, 1987) et ceci sur les 6 pluies simulées.

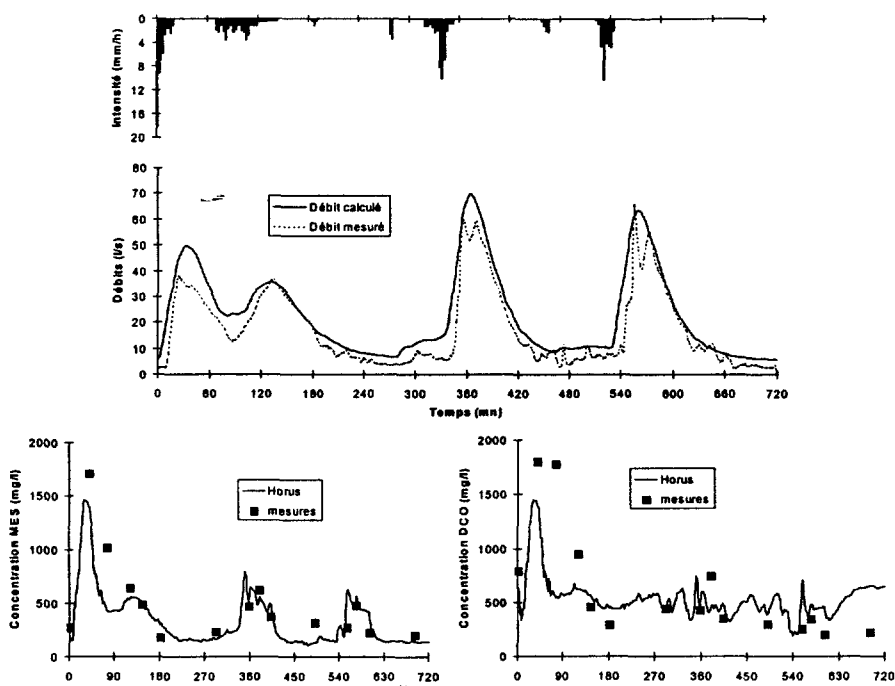


Figure 6 Entzheim, pluie du 03/05/88.
Entzheim, 03/05/88 rainfall.

6 - VALIDATION QUANTITATIVE POUR LES MES

L'approche quantitative est une méthode d'évaluation statistique de la qualité d'un modèle indépendante du jugement « subjectif » de l'observateur. Cette approche comporte des avantages et des inconvénients et à ce titre, elle doit être menée en parallèle de l'étude qualitative. S'il existe de nombreux critères statistiques pour comparer deux séries de points et ainsi fournir des éléments sur la crédibilité d'un modèle, il est nécessaire de définir, ou plutôt de proposer des seuils à partir desquels un modèle peut être considéré comme acceptable. Si certaines propositions sont avancées dans le domaine de l'hydrologie ou de l'hydraulique (SEMSAR, 1995), il n'en est pas de même dans le domaine de la pollution, et ceci provient autant du type de mesures expérimentales disponibles (et donc des erreurs dont elles sont entachées) que de l'absence d'approche quantitative dans ce domaine. Nous avons adapté deux séries de méthodes à base de critères statistiques :

- une méthode simplifiée qui consiste à comparer certaines grandeurs caractéristiques des pollutogrammes, sous forme de calcul d'erreurs et d'écart types entre valeurs simulées et mesurées ;
- une méthode globale qui compare la forme générale des pollutogrammes, par le biais d'un Écart Quadratique Total Global (EQTglobal), calculé à partir des

écarts quadratiques totaux entre concentrations (Eqtconc) et flux (Eqtflux) mesurés et simulés, tel que :

$$EQT_{global} = \sqrt{Eqtconc^2 + Eqtflux^2} \quad (1)$$

À titre d'exemple, les figures 7 et 8 montrent, pour les réseaux de type 1 et de type 2 et 3, les erreurs relatives des résultats d'Horus par rapport aux mesures en fonction de plages de concentrations mesurées. Dans ces figures, les limites inférieures x et supérieures y des plages de concentrations ou l'on étudie les erreurs sont notées x_y .

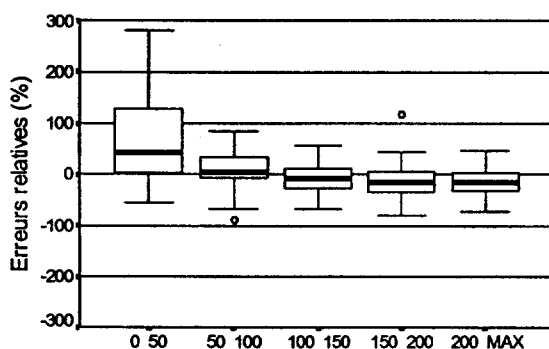


Figure 7 Erreurs relatives, réseaux de type 1.
Relative errors, networks type 1.

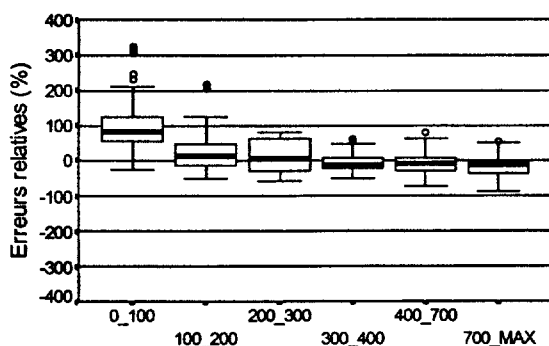


Figure 8 Erreurs relatives, réseaux de types 2 et 3.
Relative errors, networks type 2 and 3.

L'examen de ces graphiques montre que les erreurs relatives les plus importantes sont obtenues pour des concentrations inférieures à 50 mg/l pour les réseaux de type 1 et inférieures à 100 mg/l pour ceux de type 2 et 3. Les principaux résultats pour la simulation des MES sont regroupés sous forme synthétique dans le tableau 2. À titre d'information, les différentes bornes d'EQTglobal proposées par SEMSAR (1995) pour définir la qualité d'ajustement d'un modèle

hydraulique sont respectivement : inférieur à 1.5 % pour une qualité excellente, à 5 % pour une « bonne » qualité, à 10 % pour une qualité acceptable et supérieur à 10 % pour une qualité « mauvaise ».

Les mesures disponibles, les types de réseaux ainsi que le nombre d'épisodes pluvieux représentatifs permettent de qualifier les résultats obtenus comme étant tout à fait satisfaisants. En effet, les écarts quadratiques totaux globaux sont inférieurs à 8 % pour la moitié des pluies simulées et, en dehors des valeurs de concentrations faibles sur lesquelles les erreurs de mesures peuvent être très importantes, les moyennes et écarts types des erreurs relatives sont respectivement de 0,15 % et 40 % pour les réseaux de type 1 et 13 % et 60 % pour les réseaux de type 2 et 3. De plus, la différence des masses transitées excède rarement 20 % et les formes générales des pollutogrammes en concentrations sont correctement reproduites. Ne disposant pas de données en nombre suffisant concernant les dépôts en collecteur sur les sites testés, nous ne pouvons conclure sur ce sujet.

Tableau 2 Principaux résultats de la phase de validation d'Horus.

Table 2 Principals results in the validation stage of the Horus model.

	Réseaux de Type 1	Réseaux de Type 2 et 3
Nombre de réseaux utilisés	3	3
Nombre de pluies utilisées	31	15
Nombre de mesures en MES	267	273
Moyenne des erreurs relatives	toutes mesures : 15 % mesures > 50 mg/l : 0,15 %	toutes mesures : 51,3 % mesures > 100 mg/l : 13 %
Écart type des erreurs relatives	toutes mesures : 60 % mesures > 50 mg/l : 40 %	toutes mesures : 90 % mesures > 100 mg/l : 60 %
Écart Quadratique Total Global	50 % des pluies < 7,5 7,5 < 25 % des pluies < 13,5 25 % des pluies > 13,5	50 % des pluies < 8 8 < 25 % des pluies < 12 25 % des pluies > 13
Erreurs relatives sur les masses	1 %	1,2 %
Écart type sur les masses	26 %	19 %
Erreurs sur les masses comprises entre - 20 et 20 %	75 %	75 %

7 - CONCLUSIONS

Le modèle Horus est un modèle de recherche, de type conceptuel et qui simule le fonctionnement hydraulique et les principaux phénomènes de production et de transfert des solides en réseau d'assainissement. Les polluants simulés sont les MES, DCO et la DBO5.

Le calage des algorithmes d'Horus a été réalisé sur six bassins versants et onze pluies par optimisation numérique et a conduit au choix d'un seul et unique jeu de paramètres pour l'ensemble des sites et pluies étudiées. La vali-

dation du modèle Horus a été réalisée sur les mêmes sites utilisés lors du calage, mais sans aucune modification du jeu de paramètres de calage, et avec 47 pluies non utilisées lors du calage.

Le nombre des données expérimentales disponibles sur des réseaux de caractéristiques très différentes ont permis l'obtention de résultats satisfaisants pour l'évaluation des pollutogrammes en concentration et en flux pour les différents polluants simulés. En effet, le modèle Horus permet de reproduire la forme et la position temporelle des pollutogrammes ainsi que les valeurs extrêmes (sauf si ces valeurs ne correspondent pas à un pic de pluie) avec une différence de masse transitée excédant rarement 20 %, et ceci pour des bassins versants séparatifs, mixtes ou unitaires.

La qualité des résultats obtenus est encourageante et permet d'envisager des développements ultérieurs. À l'heure actuelle, la disponibilité des mesures expérimentales, la métrologie et bien sûr la quantification des erreurs de mesures constitue le **principal facteur limitant** de la modélisation de la pollution. Ainsi, les perspectives sont envisagées à travers deux grandes familles d'étude, devant être menées de manière simultanée :

- *des études complémentaires à ce travail de modélisation* comme la multiplication des cas de validation en France et à l'étranger, l'ajout du calcul du charriage en se basant sur les résultats d'études spécifiques, l'affinement du modèle de transport solide par l'évaluation du transport par charriage ou encore la réalisation de simulations sur des longues durées pour évaluer les flux et masses de dépôts sur une longue période ;

- *des expérimentations* comme des mesures en continu sur de longues durées (notamment par l'emploi de turbidimètres, conductivimètres et sondes multi-paramétriques) pour s'affranchir du caractère particulier des prélèvements instantanés, ou, des mesures non plus seulement sur les indicateurs de pollution globaux, mais en distinguant les fractions particulaires et solubles.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une collaboration avec l'ENGEES et l'IMF de Strasbourg. Les données utilisées pour la mise au point du modèle Horus proviennent principalement de la base de données sur la qualité des rejets urbains par temps de pluie QASTOR (SAGET, 1994), de L'ENGEES pour le site d'Entzheim et de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne pour le site de Budron (CIPEL, 1996).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALLEY W.M., SMITH P.E., 1981. Estimation of accumulation Parameters for urban runoff quality modelling. *Water Resources Research*, 17(6), 1657-1664, December 1981.
- ARTIERES O. 1987. Les dépôts en réseau d'assainissement: origines, caractéristiques, pollution, transport. Thèse de doctorat de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg, 1987, 214 p.
- ASHLEY R.M., CRABTREE R.W. 1992. Sediment origins, deposition and build-up in combined sewer systems. *Water Sciences and Technology*, 33(8), 1-12.
- BERTRAND-KRAJEWSKI J.L. 1992. Modélisation conceptuelle du transport solide en réseau d'assainissement unitaire. Thèse de doctorat de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg, 1992, 205 p.
- BERTRAND-KRAJEWSKI J.L., SCRIVENER O., BRIAT P. 1993. Sewer sediment production and transport modelling: A literature review. *Journal of Hydraulic Research*, 31(4), 435-460.
- BROMBACH H. 1984. Model zur Berechnung des Abflusses von befestigten Flächen. *Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft*, Heft 79, 103-125.
- BUJON G. 1988. Préviation des débits et des flux polluants transités par les réseaux d'égouts par temps de pluie. Le modèle FLUPOL. *La Houille Blanche*, 1, 11-23.
- CHEBBO G., MOUCHEL J.M., SAGET A., GOUSAILLES M. 1995. La pollution des rejets urbains par temps de pluie : flux nature et impacts. *TSM* 11, 796-804.
- CIPEL 1996. Etude de la contamination induite par les eaux de ruissellement en milieu urbain. Programme intercantonal. EPFL Lausanne, Suisse.
- DEBARDAT M. 1991. Tests de Mosquito sur Entzheim. Rapport ENITRS/Lyonnaise des Eaux-Dumez, Strasbourg, Mai 1991, 18 p. + annexes (Non publié).
- ELLIS J.B., HVITVED-JACOBSEN T. 1996. Urban drainage impacts on receiving waters. *Journal of Hydraulic Research*, 34 (6), 771-783.
- JEWELL T.K., ADRIAN D.D. 1978. SWMM stormwater pollutant washoff functions. *Journal of the Environment Engineering Division*, 1978, 104(5), 489-499.
- N. 1998. Hydroworks version 4.0, on line documentation. Wallingford Software Ltd., Wallingford, UK.
- NIELSEN M., CARTENSEN J., HARREMOENS P. 1996. Combined control of sewer treatment plant during rainstorm. *Water Sciences and Technology*, 34, 3-4.
- NUMERICAL RECIPIES 1986. The Art of the scientific computing. Press W.H. et al., Cambridge University Press.
- PHILIPPE J.P., RANCHET J. 1987. Pollution des eaux de ruissellement pluvial en zone urbaine. Synthèse des mesures de 10 bassins versants en région parisienne. Rapport de recherche LCP N°142, Laboratoire des Ponts et Chaussées, Paris, 76 p.
- SAGET A. 1994. Base de données sur la qualité des rejets urbains par temps de pluie : distribution de la pollution rejetée, dimensions des ouvrages de collecte. Thèse de doctorat de l'ENPC, Paris, 33 p.
- SARTOR J.D., BOYD G.B. 1972. Water pollution aspects of street surfaces contaminants. In EPA-R2-72-081.
- SEMSAR A. 1995. Mise au point d'une méthodologie d'évaluation et de comparaison des modèles de simulation hydraulique des réseaux d'assainissement. Thèse de l'INSA Lyon, 272 p.
- VERBANCK, M.A., ASHLEY, R.M., BACHOC, A. 1994. International workshop on origin, occurrence and behaviour of sediments in sewer systems: summary of conclusions. *Water Research* 28(1), 187-194.
- XANTHOPOULOS C. HAHN H. 1993. Anthropogenic pollutants wash-off from street surface. 6th Int. Conf. on Urban Storm drainage, Niagara Falls, Canada, 417-422.
- ZUG M. 1998. Modélisation conceptuelle de la pollution par temps de pluie en réseau d'assainissement. Thèse de doctorat de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg, 241 p.
- ZUG M., BELLEFLEUR D., PHAN L., SCRIVENER O. 1998a. Sediment transport

model in sewer networks, a new utilisation of the Velikanov Model. *Water Sciences and Technology*, 37, 1, 187-196.

ZUG M., PHAN L., BELLEFLEUR D., SCRIVEN O. 1998b. Testing bench of pollution modelling algorithm in urban sewer networks. Conference of Hydroinformatics 98, Copenhagen, Denmark, 1491-1497.

ZUG M., PHAN L., BELLEFLEUR D., SCRIVEN O. 1998c. Pollution wash-off modelling in sewer networks: Calibration, Validation and Transposition. Novatech 98, 3^e Conférence internationale sur les nouvelles technologies en assainissement pluvial. Lyon, France, 4-6 Mai 1998, 1, 131-138.